

Primjena nanokompozita u zrakoplovnoj tehnologiji

Penić, Anamarija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:158048>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Anamarija Penić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja **Anamarija Penić**

Predala je izrađen završni rad dana: 28. kolovoza 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
prof. dr. sc. Mirela Leskovic, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije
doc. dr. sc. Andrej Vidak, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 2. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Anamarija Penić

**PRIMJENA NANOKOMPOZITA U ZRAKOPLOVNOJ
TEHNOLOGIJI**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Članovi ispitnog povjerenstva: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić

prof. dr. sc. Mirela Leskovic

Zagreb, rujan 2024.

SAŽETAK

PRIMJENA NANOKOMPOZITA U ZRAKOPLOVNOJ TEHNOLOGIJI

Ovaj rad razmatra ključne zahtjeve za materijale u zrakoplovstvu, kao i svojstva koja oni moraju imati kako bi se osigurala visoka sigurnost, pouzdanost i optimalne performanse tijekom leta. Glavni predmet interesa su nanokompoziti koji kombiniraju punila nanometarskih veličina s polimernim, keramičkim ili metalnim matricama. Ovi materijali donose značajna poboljšanja u odnosu na konvencionalne kompozite i pojedinačne komponente, nudeći izvrsna mehanička, električna i toplinska svojstva te visoku otpornost na koroziju i trošenje. Rad daje pregled višefunkcionalnih svojstava nanokompozita koja, između ostalog, proizlaze iz homogene disperzije nanopunila u matrici te razmatra njihove primjene u zrakoplovstvu. Prikazana je moguća primjena nanokompozita u baznim strukturnim dijelovima, komponentama pogonskih i senzorskih sustava, zaštitnim premazima te unutrašnjosti zrakoplova. Nekoliko specifičnih primjera modernih zrakoplova ilustrira kako integracija nanokompozita može unaprijediti performanse i pružiti uvid u buduće trendove istraživanja unutar zrakoplovne industrije.

Ključne riječi: nanokompoziti, zrakoplovstvo, svojstva, materijali, konstrukcija, održivost

ABSTRACT

APPLICATION OF NANOCOMPOSITES IN AEROSPACE TECHNOLOGY

This paper examines the key requirements for aerospace materials, and the properties they must possess to ensure high reliability, safety and optimal performance during flight. The primary focus is on nanocomposites which combine nanoscale fillers with polymer, ceramic or metal matrices. These materials offer significant improvements over conventional composites or individual components, including excellent mechanical, electrical and thermal properties as well as high resistance to corrosion and wear. The paper reviews the multifunctional properties of nanocomposites, which, among other factors, result from the homogeneous dispersion of nanofillers in the matrix and considers their applications in aerospace. The potential use of nanocomposites in structural components, propulsion and sensor system, protective coatings, and aircraft interiors is presented. Several specific examples of modern aircraft illustrate how the integration of nanocomposites can enhance performance and provide insight into future research trends within the aerospace industry.

Keywords: nanocomposites, aerospace, properties, materials, construction, sustainability

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MATERIJALA ZRAKOPLOVNE KONSTRUKCIJE	2
3. OSNOVNE ZNAČAJKE MATERIJALA	4
3.1. Zahtjevi za odabir materijala	4
3.2. Svojstva materijala na makrorazini.....	5
3.2.1. Čvrstoća.....	5
3.2.2. Krutost.....	6
3.2.3. Dinamička izdržljivost.....	6
3.2.4. Žilavost.....	7
3.2.5. Mehanička otpornost pri visokim temperaturama	8
3.2.6. Otpornost na koroziju	8
3.3. Svojstva materijala na nanorazini	9
3.3.1. Mehanička svojstva	9
3.3.2. Kemijska svojstva.....	10
4. NANOKOMPOZITI	11
4.1. Razlike između mikrokompozita i nanokompozita.....	11
4.1.1. Veličina čestica punila	12
4.1.2. Veličina međupovršine.....	12
4.1.3. Morfologija kompozita	12
4.1.4. Udio matrice u međufaznom sloju.....	13
4.2. Podjela nanokompozita s obzirom na materijal matrice	13
4.2.1. Nanokompoziti polimerne matrice	13
4.2.2. Nanokompoziti keramičke matrice	14
4.2.3. Nanokompoziti metalne matrice	15
4.3. Vrste nanopunila.....	15
4.3.1. Slojevita nanopunila	16
4.3.2. Nanovlakna i nanocijevi	17
4.3.3. Nanočestice	18
5. PRIMJENA NANOKOMPOZITA U ZRAKOPLOVSTVU.....	19
5.1. Strukturni dijelovi zrakoplova	19
5.1.1. Trup, krila i rep	20
5.1.2. Pogonski sustav	21
5.1.3. Kočioni sustav	21
5.1.4. Unutrašnjost	22
5.2. Premazi.....	23

5.2.1. Antikorozivni premazi	23
5.2.2. Premazi za zaštitu od erozije	23
5.2.3. Premazi za odleđivanje i sprječavanje zaleđivanja	24
5.2.4. Premazi za apsorpciju radara	24
5.3. Ostale primjene	25
5.3.1. Senzori.....	25
5.3.2. Zaštita od udara groma	25
5.3.3. Nanokompozitna ljepila.....	25
6. PRIMJENA (NANO)KOMPOZITA NA MODERNIM ZRAKOPLOVIMA	26
6.1. Boeing 787 Dreamliner	26
6.2. Airbus A380 i A350 XWB.....	27
6.3. Lockheed Martin F-35 Lightning II.....	28
6.4. Boeing 777X	28
7. ZAKLJUČAK	30
8. POPIS OZNAKA I KRATICA	31
LITERATURA	32

1. UVOD

Zrakoplovna industrija neprestano napreduje zahvaljujući brojnim tehnološkim inovacijama koje poboljšavaju performanse i sigurnost zrakoplova. Strukturni materijali evoluirali su od drva, preko laganih aluminijskih i magnezijevih legura, do konvencionalnih kompozita. S razvojem tehnologije i rastućim zahtjevima za smanjenje težine, potrošnje goriva, poboljšanje operativne učinkovitosti i smanjenje emisija štetnih plinova, potreba za još naprednijim materijalima postaje sve izraženija. Osim što moraju biti lagane, zrakoplovne konstrukcije trebaju imati izvrsna mehanička svojstva poput visoke čvrstoće, žilavosti, otpornosti na zamor, udarce i ogrebotine. Također, potrebno je osigurati otpornost na UV zračenje, visoku električnu vodljivost i toplinsku emisiju. Trenutni trendovi usmjereni su na razvoj materijala unaprijeđenih svojstava u skladu sa zahtjevima zrakoplovstva, pri čemu nanokompoziti igraju ključnu ulogu u ostvarivanju tih ciljeva. Riječ je o materijalima koji najčešće kombiniraju polimerne, keramičke ili metalne matrice s punilima nanometarske veličine što rezultira izuzetnim svojstvima poput povećane čvrstoće, krutosti, otpornosti na zamor i lom, uz istovremeno zadržavanje male mase. Također, njihova sposobnost prilagodbe i integracije funkcionalnih svojstava; električne i toplinske vodljivosti, otpornosti na gorenje i koroziju otvara nove mogućnosti za razvoj naprednih struktura, a doprinosi i smanjenju troškova održavanja. [18, 23, 32] Istraživanja i razvoj u ovom području ubrzano napreduju, a suvremena tehnološka rješenja i proizvodne metode omogućuju sve veću integraciju nanokompozita unutar strukturnih dijelova zrakoplova, senzorskih sustava, zaštitnih premaza i drugih komponenata.

Ovaj rad izlaže neophodna svojstva materijala i zahtjeve koje isti moraju ispuniti kako bi ponajprije osigurali sigurnost, pouzdanost i učinkovitost zrakoplovnih sustava. Rad obuhvaća opći pregled i podjelu nanokompozita, analizira njihova ključna svojstva te ističe (potencijalnu) primjenu, ilustrirajući kako ovi napredni materijali mogu značajno unaprijediti performanse zrakoplova. Kroz konkretne primjere modernih zrakoplova prikazano je kako konvencionalni kompoziti postupno ustupaju mjesto nanokompozitima koji omogućuju razvoj još lakših, jačih i energetski učinkovitijih letjelica koje udovoljavaju rastućim zahtjevima za održivošću.

2. POVIJESNI PREGLED RAZVOJA MATERIJALA ZRAKOPLOVNE KONSTRUKCIJE

Materijali u zrakoplovnoj industriji u znatnoj su se mjeri mijenjali od početaka pa sve do danas, nastojeći ostvariti što bolju funkcionalnost, kvalitetu, trajnost kao i brojne druge karakteristike. Godine 1903., braća Wright izvela su povijesno važan prvi let motornim zrakoplovom. Zrakoplov imena Flyer bio je sastavljen od tradicionalnih materijala; drva, tkanine, čeličnih žica, aluminijske legure i kositra korištenog za izmjenjivač topline. [1] Iako drvo nudi prednosti kao što su relativno mala masa, jednostavna obrada te otpornost na zamor, ima i nedostataka poput nedovoljne homogenosti, anizotropnosti, sklonosti vlazi i organskim manama. [2] Zbog tih ograničenja, drvo nije moglo zadovoljiti zahtjeve zrakoplovne industrije, pa je tako započela potraga za boljim i prikladnijim materijalima.

Za vrijeme Prvog svjetskog rata otpočeli su bitni koraci ka daljnjem usavršavanju zrakoplova, posebice vojnih. U tom je razdoblju njihova brzina porasla više od dva, a snaga motora za oko četiri puta. Više je faza razvoja u ovom periodu, ali je posebno važno istaknuti upotrebu metalnih konstrukcija te uvlačenje stajnog trapa.

Tijekom i nakon Drugog svjetskog rata, zrakoplovstvo je doživjelo znatne inovacije i uporabu naprednijih materijala čije su značajke trebale zadovoljiti postavljene zahtjeve. Izrađena je kabina pod tlakom, a uvedena je i radarska navigacija. Upotreba legura obojenih lakih metala poput aluminija, titana i magnezija, kao i primjena čelika unaprijedila je strukturnu čvrstoću i dugovječnost zrakoplovnih konstrukcija, što je rezultiralo povećanom sigurnošću. [3] Aluminijska legura korištena je pri izradi motora čime je postignuto smanjenje mase zrakoplova, dok su spremnici goriva bili od aluminijskog lima presvučenog gumom. Čelik koji se koristi pri ovoj vrsti konstrukcija je čak do četiri puta jači, ali je i tri puta teži od aluminija. Zbog svojih iznimnih mehaničkih svojstava, predstavlja nezamjenljiv materijal za sve bazne dijelove i spojeve zrakoplova poput glavnih okova krila, repnih dijelova i stajnog trapa. [1] Titan i njegove legure istaknuli su se zbog svojih sličnih karakteristika s čelikom. Otprilike je jak poput čelika i teži upola manje, iako nije lagan kao aluminij. [4] Titan bolje odolijeva koroziji naspram aluminija, a posebice čelika te je veće žilavosti i visoke otpornosti na povišenim temperaturama. Koristi se pri izradi dijelova koji su mehanički i toplinski opterećeni, za mlazne motore, opremu za kabine, nosače krila, ali i manje dijelove. [5]

Današnji zrakoplovi koriste nove materijale koji ispunjavaju zahtjeve za složenije eksploatacijske uvjete. Kompozitni materijali kombinacija su najmanje dva različita materijala kontinuirano raspoređene faze s ciljem poboljšanja barem jednog, a često i više svojstava izvornog materijala. Ovi materijali ističu se kao esencijalni materijali zbog svoje jedinstvene kombinacije visoke čvrstoće i niske gustoće, što rezultira smanjenom težinom i kao posljedicom, smanjenom potrošnjom goriva. Također, pokazuju povećanu otpornost na ekstremne uvjete, vibracije i naprezanja koja se javljaju tijekom leta. [6] Predvodnici kompozitnih materijala bili su polimeri ojačani ugljičnim vlaknima koji su isprva našli primjenu u manje zahtjevnim komponentama kao što su pilotske kabine i lopatice rotora helikoptera. Međutim, zahvaljujući stalnim tehnološkim dostignućima, koriste se i u proizvodnji kompleksnijih dijelova poput zrakoplovnih trupova i krila. [1, 7]

Neprestano se istražuju novi i bolji kompozitni, a trenutno i nanokompozitni materijali koji su lakši, čvršći, otporniji na koroziju i visoke temperature, manje osjetljivi na zamor i oštećenja te superiorniji u različitim aspektima zrakoplovne tehnologije. [8]

3. OSNOVNE ZNAČAJKE MATERIJALA

U zrakoplovnom inženjerstvu potrebno je sveobuhvatno razumijevanje karakteristika materijala kako bi se isti pravilno primjenjivali prilikom izrade zrakoplovnih konstrukcija. Kako bi se osigurala visoka sigurnost, trajnost i optimalne performanse, izbor materijala mora biti takav da zadovolji učinkovit rad u zahtjevnim okolnostima. Svaki se materijal odlikuje određenim značajkama, odnosno svojstvima koja ga obilježavaju te određuju potencijalnost njegove primjene. [9] Za različita opterećenja zrakoplova odabiru se drugačiji materijali u skladu sa specifičnim zahtjevima i svojstvima. Cijena zrakoplova u znatnoj je mjeri ovisna o materijalu konstrukcije, čak do 60 % ukupnog iznosa, što svakako naglašava potrebu za što boljim materijalima. [10, 11]

3.1. Zahtjevi za odabir materijala

Napretkom zrakoplovne industrije postavljaju se sve stroži zahtjevi za materijale zrakoplovnih komponenata, a koje tradicionalni materijali ne mogu ispuniti u potpunosti. Glavni funkcionalni i eksploatacijski zahtjevi koje materijali trebaju ispuniti su; mala masa, zadovoljavajuća čvrstoća i krutost, otpornost na iznenadno širenje pukotine i zamor materijala, otpornost na gorenje, korozijska postojanost, otpornost pri visokim temperaturama te prigušivanje vibracija i buke. [10]

Osim osnovnih zahtjeva koji su određeni pojedinom odlikom materijala, potrebno je razmotriti i dodatne kriterije, a koji su: [1]

- specifična čvrstoća - omjer vlačne čvrstoće i gustoće materijala
- specifična krutost - omjer modula elastičnosti i gustoće materijala
- sigurnost - umnožak granice razvlačenja i lomne žilavosti

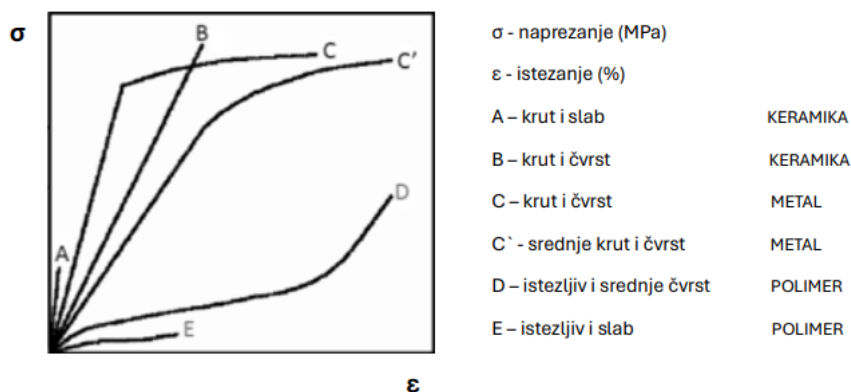
Pri odabiru materijala vrlo je važno uzeti u obzir način kako se određeni materijal može obraditi i oblikovati pojedinom tehnološkom metodom. Raspoloživost, trajnost i estetičnost materijala, financijski aspekt i održivost također imaju vrlo znatan utjecaj kod izbora. [12]

3.2. Svojstva materijala na makrorazini

Različiti oblici sila opterećenja (aerodinamičke, statičke, dinamičke) na zrakoplovnim konstrukcijama uzrokuju rastezanje, savijanje, izvijanje, a katkad i brzo pucanje elemenata. Zrakoplovni sustavi podložni su različitim okruženjima, uključujući velike brzine, turbulencije, ali i promjene temperature, vlage i tlaka. Poradi ovih razloga nužno je poznavati svojstva materijala i pravilno ih odabrati prema opterećenjima i okruženjima kojima su izloženi. Najpotpunije i najpouzdanije informacije o svojstvima materijala dobivaju se propisanim laboratorijskim istraživanjima ispitnih tijela napravljenih od poluproizvoda ili već dovršenih dijelova te praćenjem istih u izradi i uporabi. Kada se govori o svojstvima materijala, obično se podrazumijevaju kemijska, fizikalna i mehanička svojstva, postojanost na biološke utjecaje, proizvodno - tehnološka svojstva te uporabno - eksploatacijske karakteristike. [13]

3.2.1. Čvrstoća

Za izradu pojedinih elemenata zrakoplova potrebni su materijali odgovarajuće mehaničke čvrstoće kako bi se osigurala izdržljivost pod opterećenjima tijekom uporabe. Sposobnost materijala da pruža otpor razdvajanju svojih dijelova uslijed primijenjene sile naziva se čvrstoća. Dakle, to je otpornost prema pojavi loma, trajnih deformacija ili oštećenja. Mehanička krivulja, poznata kao i krivulja naprezanje – istezanje, prikazuje ovisnost vlačnog naprezanja (σ) i relativnog produljenja ili deformacije (ϵ). Naprezanje je sila koja djeluje na jedinicu površine opterećenog materijala, dok je deformacija promjena oblika materijala zbog djelovanja sile. Važna karakteristika materijala je granica razvlačenja koja predstavlja najniže naprezanje kod kojega počinje *tečenje* materijala i uz mala povećanja naprezanja dolazi do velikih deformacija. Do granice razvlačenja, deformacija je elastična i primjenjiv je Hookov zakon, što znači da se materijal prestankom djelovanja sile može vratiti u prvobitni oblik. Materijal se ne smije izložiti naprezanju koje prelazi granicu razvlačenja jer to može rezultirati plastičnom deformacijom nakon koje materijal ne može povratiti svoj prvotni oblik. [14] Kompoziti se, zahvaljujući svojstvima visoke čvrstoće i male mase, često koriste kao poželjni materijali za zrakoplovne konstrukcije. Iznimnu čvrstoću ovih materijala moguće je postići ojačalima ugljičnih vlakana nanometarskih dimenzija. [1] Na slici 1 prikazane su mehaničke krivulje za različite vrste materijala (metal, keramika i polimer).



Slika 1. Tipične mehaničke krivulje različitih skupina materijala

3.2.2. Krutost

Materijal treba biti ne samo zadovoljavajuće čvrst već i krut kako bi se spriječilo izvijanje dijelova konstrukcije. Krutost se definira kao otpornost elemenata konstrukcije prema deformaciji uslijed djelovanja opterećenja. Općenito se mogu definirati tri vrste krutosti: aksijalna, fleksijska (krutost na savijanje) i torzijska (krutost na uvijanje). Krutost materijala određuje Young-ov modul ili modul elastičnosti. Modul elastičnosti jednak je omjeru vlačnog naprezanja i deformacije u linearnom, odnosno elastičnom području dijagrama naprezanje u ovisnosti o istezanju. Visoka vrijednost modula ukazuje na čvrstu vezu, a niska vrijednost na slabiju vezu i manju krutost materijala. Materijali poput čelika i titana imaju visoke module elastičnosti što ih čini vrlo krutima. Kompoziti, s druge strane, posjeduju visoku specifičnu krutost, što znači da imaju visoku krutost uz nisku masu. [1, 14]

3.2.3. Dinamička izdržljivost

Nerijetko su zrakoplovne komponente izložene dinamičkom opterećenju promjenjivim s vremenom. Zamor materijala je posljedica postupnog oštećenja materijala uslijed dugotrajnih periodičnih opterećenja. [13] U slučaju dinamičkog opterećenja, do loma materijala dolazi pri naprezanjima koja su niža u odnosu na njegovu maksimalnu vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja. Odnosno, lomovima koji nastaju zbog zamora materijala ne prethodi razvlačenje materijala. Sposobnost materijala da izdrži dinamičko naprezanje naziva se dinamička izdržljivost materijala. Pukotine uzrokovane zamorom materijala

predstavljaju izuzetno oštre prirodne raspukline koje se teško mogu detektirati prije loma, a nastaju na mjestima najintenzivnijih naprezanja. [15] Tablicom 1 prikazana su oštećenja materijala u zrakoplovstvu te njihova zastupljenost u postotcima. Najzastupljenije oštećenje je upravo lom uvjetovan zamorom materijala. [1]

Tablica 1. Prikaz učestalosti oštećenja materijala prilikom eksploatacije [1]

VRSTA OŠTEĆENJA	ZASTUPLJENOST (%)
Lom od zamora	61
Preopterećenje	18
Napetosna korozija	9
Trošenje abrazijom i erozijom	7
Opća korozija	3
Visokotemperaturna korozija	2

3.2.4. Žilavost

Materijali s visokom žilavošću su vrlo bitni zbog svoje sposobnosti da izdrže naprezanja rastezanjem ili deformacijom bez loma. Drugim riječima, žilavi materijali mogu podnijeti značajnu plastičnu deformaciju prije loma, a ukoliko dođe do stvaranja pukotine ona se neće širiti sve dok se ne poveća naprezanje. Žilavost je indikator otpora materijala prema širenju pukotine. Suprotno tome, karakteristika materijala koja omogućava lom bez prethodne plastične deformacije znana je kao krhkost ili krtost. Kod krhkih materijala, zbog niske mobilnosti dislokacija, naprezanje se koncentrira na vrhu mikropukotine na jednoj vezi što uzrokuje pucanje, zatim naprezanje prelazi na sljedeću vezu i stvorena se pukotina brzo širi i bez povećanja naprezanja sve do loma. [14] Kako bi se spriječilo nepoželjno padanje zrakoplova uslijed različitih vrsta lomova, konstrukcijski materijali trebaju biti dizajnirani tako da spriječe nastanak i brzo širenje pukotina.

3.2.5. Mehanička otpornost pri visokim temperaturama

Zrakoplovne komponente poput onih pogonskog sustava, tijekom rada su izložene visokim temperaturama što zahtijeva da materijali od kojih su izrađeni očuvaju svoju mehaničku čvrstoću. S porastom temperature, materijali mogu pokazivati smanjenje vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i dinamičke izdržljivosti, dok se istovremeno može povećati njihova istezljivost i pojava puzanja. Puzanje je pojava porasta deformacija tijekom vremena i pri visokim temperaturama uz konstantna naprezanja. Puzanje prestaje ako materijal pri deformiranju primjereno očvrsne, inače se nastavlja sve do loma materijala. Materijali kao što su superlegure na bazi kobalta i nikla, metali i legure s visokim talištem (poput volframa, tantala, molibdena i kroma) te metalni nanokompoziti, pokazuju iznimnu otpornost na puzanje. [12]

3.2.6. Otpornost na koroziju

Korozija je proces međudjelovanja metala i njegova okoliša koji rezultira promjenom funkcionalnih svojstava metala, okoliša ili tehničkog sustava koji čine. U zrakoplovstvu su najučestaliji oblici korozije napetosna korozija, korozija ljuštenjem i galvanska korozija. Napetosna korozija nastaje zbog sinergijskog djelovanja agresivnog okoliša i mehaničkog (vlačnog) naprezanja. Često se javlja na mjestima hladne deformacije zbog zaostalih naprezanja ili blizu zavarenih spojeva gdje su napetosti izazvane toplinskim procesima. Kako bi se umanjila sklonost ovoj vrsti korozije, preporučuje se postupak žarenja radi smanjenja preostalih naprezanja, upotreba inhibitora, a ako je moguće i pogodnog materijala otpornijeg na ovu vrstu oštećenja. Drugi oblik, korozija ljuštenjem, odvija se kada se na površini materijala formiraju različiti kemijski produkti, obično oksidi. Galvanska korozija nastaje kada se dva različita metala, poput aluminija i čelika, nađu u kontaktu u prisustvu elektrolita, primjerice vode ili vlage iz atmosfere. Također je česta kod kombinacija kompozitnih materijala (manje sklonih koroziji) i metala (sklonijih koroziji). [1]

3.3. Svojstva materijala na nanorazini

Materijali dimenzija manjih od 100 nm pokazuju različita svojstva u usporedbi s istim materijalima na makro razini. Upravo te male dimenzije uzrokuju pojavu novih svojstava, a onda i primjena. Razlike mogu biti primjetne u promjeni više ili tek jednog svojstva, a višestruke koristi postižu se kombinacijom nanoobjekata s drugim osnovnim materijalima, kao što je slučaj nanokompozita. Zasad je nemoguće na jedinstven način objasniti zašto se svojstva na nanorazini mijenjaju, ali neke od najvažnijih razlika u odnosu na makromaterijale su sljedeće: [16]

- elektronska struktura nanomaterijala drugačija je nego makromaterijala
- nanočestice imaju znatno veći omjer površine i volumena u odnosu na makromaterijale, granice zrna su učestalije
- gravitacijske sile su zanemarive u odnosu na elektromagnetske sile
- nasumično gibanje čestica od velike je važnosti

3.3.1. Mehanička svojstva

Polikristalinični materijali okarakterizirani su slučajnom usmjerenošću kristalnih zrna unutar materijala. Granica zrna predstavlja kraj dislokacije i djeluje kao prepreka njihovom kretanju, pa se plastična deformacija zaustavlja na granici pojedinog zrna. Integritet zrna ostaje sačuvan, a zrna se samo izobličuju ili izdužuju. Budući da su zrna nejednako orijentirana, za klizanje dislokacija u nepovoljno orijentiranim zrnima potrebno je veće naprezanje. Materijal s manjim zrnima imat će više ograničenja pri kretanju dislokacija, što ga čini čvršćim i otpornijim prema plastičnoj deformaciji. Dodatak malog udjela nanočestica materijalu može povećati njegovu tvrdoću. Smanjenjem veličina zrna također raste otpornost na zamor materijala, kao i čvrstoća pri visokim temperaturama što je vrlo važno za konstrukciju letjelica. [16, 17]

3.3.2. Kemijska svojstva

Nanočestice imaju znatno veću površinsku energiju od makromaterijala zbog velikog broja atoma na površini. Atomi na površini ne ostvaruju sve kemijske veze, pa je energija površine veća nego u unutrašnjosti gdje nema neostvarenih kemijskih veza. Mnoga fizikalna i kemijska svojstva poput brzine kemijske reaktivnosti, katalitičke aktivnosti i korozivnosti, rezultat su povećane energije. Budući da su nanočestice reaktivnije, očekuje se da će metalne nanočestice korodirati lakše i brže od makročestica. Kako bi se spriječila korozija nanočestica važno je upotrijebiti prikladne stabilizatore. Stabilizatori se vežu na površinu nanočestica značajno povećavajući njihovu otpornost na koroziju i eroziju. Nanostrukturirane slitine mogu imati znatnu korozijsku otpornost zbog manje defekata i nehomogenosti na kojima korozija najčešće započinje. Nanočestice su dio komponenta zaštitnih prevlaka protiv korozije koji se sve više koriste u zrakoplovnoj tehnologiji. [16] Filmovi i prevlake sprječavaju koroziju materijala, imaju veliku otpornost na mehanička oštećenja što pruža kvalitetniju i dugotrajniju zaštitu.

Tablica 2. Funkcionalna svojstva nekih nanomaterijala u zrakoplovnim primjenama [18]

FUNKCIONALNA SVOJSTVA	NANOMATERIJALI
Poboljšana mehanička svojstva	Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2
Postojanost na koroziju	Nanogline
Električna vodljivost	Ugljikove nanocjevčice, grafen, SnO_2
Otpornost na gorenje	Nanogline
Toplinska stabilnost	Ugljikove nanocjevčice, ZrO_2
UV stabilnost	TiO_2 , ZnO , BaSO_4 , CeO_2 , grafen
Otpornost na udarce	SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , CaSiO_3 , gline
Plinska barijera	Nanogline, grafen

4. NANOKOMPOZITI

Kompozitni materijali, kraće kompoziti, kombinacija su najmanje dva materijala različitih svojstava s namjerom postizanja izvrsnih svojstava koje svaki materijal pojedinačno ne bi posjedovao. Sadrže kontinuiranu fazu - matricu unutar koje su ugrađene jedna ili više diskontinuiranih faza - punila ili ojačavala. Područje nanokompozita, također uključuje proučavanje materijala sastavljenih od dvije ili više komponenti punila, ali pri čemu je barem jedna od njih dimenzijskog raspona od približno 1 do 100 nm. [19] Dakle, nanokompoziti nastaju miješanjem nanoobjekata (npr. nanoslojevi, nanovlakna) unutar matrice. [16] Osnovna razlika između nanokompozita i konvencionalnih kompozita proizlazi iz veličine punila; dimenzije punila konvencionalnih kompozita su mikrometarskih raspona, a nanokompozita reda veličine nanometra. [20, 21]

Strukture na nanorazini pridonose novim svojstvima koja nemaju konvencionalni kompoziti ili pojedinačne komponente. Već mali udio nanopunila (0,5 - 5 %) značajno može poboljšati karakteristike materijala, dok konvencionalni kompoziti zahtijevaju 15 - 40 % volumena punila za postizanje sličnih efekata poboljšanja. [22, 23] Poboljšana svojstva nanokompozita odlikuju se izvanrednim mehaničkim, električnim i toplinskim svojstvima, kemijskom postojanošću te općenito višestrukom funkcionalnošću. Međutim, složeni procesi sinteze, kontrola disperzije punila, visoki troškovi i potencijalna toksičnost predstavljaju izazove koje je potrebno prevladati za njihovu širu upotrebu. [21] Ključno je kvalitetno manipulirati materijalima nanometarskih dimenzija kako bi se iskoristila njihova svojstva i omogućila integracija u sustave od nano do makroskopskih veličina.

4.1. Razlike između mikrokompozita i nanokompozita

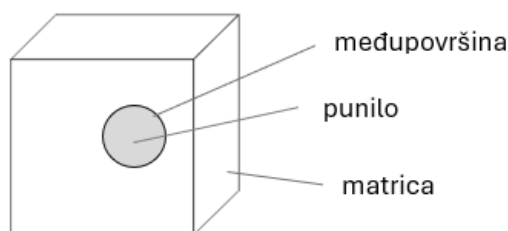
Konvencionalnim kompozitima dodavana su mikropunila što je rezultiralo dostizanjem željenih, a i usputnim pogoršanjem pokojih svojstava. Općenito je dostignut vrhunac razvoja konvencionalnih kompozita, a započet intenzivan razvitak nanokompozita, posebno polimernih. Osnovne razlike ovih dviju vrsta kompozita proističu iz razlika u veličini čestica punila, veličini međupovršine, morfologiji kompozita i udjelu matrice u međufaznom sloju.

4.1.1. Veličina čestica punila

Kao što je prethodno spomenuto, nanokompoziti su materijali koji imaju barem jednu dimenziju punila manju od 100 nm, dok je valna duljina vidljive svjetlosti raspona od 400 do 700 nm. Sukladno tome, u nanokompozitima ne dolazi do značajnog skretanja upadne svjetlosti i moguće je dobiti kompozit izvanrednih optičkih, električnih i mehaničkih karakteristika. Male čestice uvjetuju bolja mehanička svojstva radi smanjenja koncentracije naprezanja čime se bitno utječe na povećanje čvrstoće.

4.1.2. Veličina međupovršine

Međupovršina između matrice i punila značajno je mjesto jer se na doticaju ovih dviju faza uspostavljaju kemijske veze ili raznorazne interakcije koje utječu na svojstva cijelog kompozita. Ukoliko su interakcije slabe, popuštanje može započinjati na međupovršini pri jako malim napreznjima, što dovodi do loših mehaničkih karakteristika kompozita. Smanjenjem veličine čestica punila, omjer površine i volumena punila povećava se te nanopunilo ostvaruje znatno veću međupovršinu s matricom.



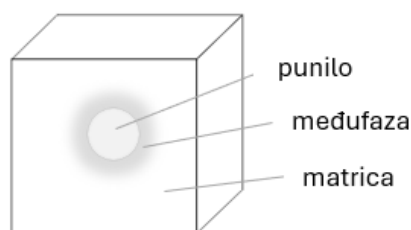
Slika 2. Prikaz međupovršine u kompozitnom sustavu

4.1.3. Morfologija kompozita

Morfologija uključuje veličinu, oblik i raspodjelu čestica punila u matrici. Osnovni motiv kod pripreme nanokompozita je osigurati jednoliku raspodjelu i disperziju punila unutar matrice. Za isti volumni udio, smanjenjem veličine čestica punila na nanometarske dimenzije dolazi do promjena u morfologiji. Broj čestica punila se povećava, a udaljenost između čestica u sustavu se smanjuje.

4.1.4. Udio matrice u međufaznom sloju

Doticaj faza u kompozitnom sustavu nije dvodimenzionalan, već se promjene svojstava npr. polimernih molekula koje su u direktnom kontaktu s površinom punila prenose na sljedeći sloj polimernih molekula dublje u masu, dok se razlike između slojeva u potpunosti ne izgube. Doticaj između faza sustava je trodimenzionalan te se definira međufazni sloj, odnosno međufaza. Udio matrice u međufaznom sloju u nanokompozitnim sustavima znatno je veći nego u mikrokompozitnim. [16]



Slika 3. Prikaz međufaze u kompozitnom sustavu

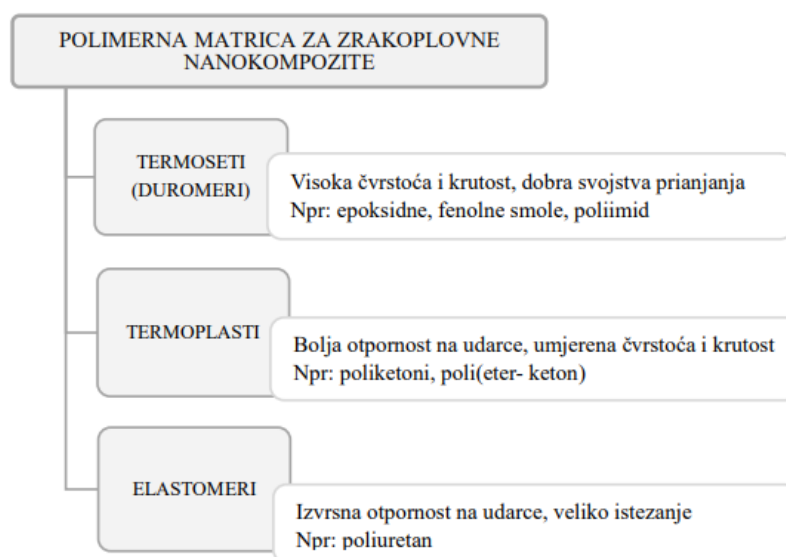
4.2. Podjela nanokompozita s obzirom na materijal matrice

Matrica predstavlja kontinuiranu fazu nanokompozita koja okružuje punila nanometarske veličine i omogućuje im ravnomjerno raspršivanje unutar kompozita. Također omogućava njihovo učinkovito djelovanje i pruža strukturalnu potporu za poboljšanja svojst(a)va novonastalog materijala. Za matricu je moguće koristiti razne materijale, ali tri su vrste pri ovom izboru najrelevantnije. Stoga, nanokompozite s obzirom na materijal matrice dijelimo na one polimerne, keramičke i metalne matrice. [23]

4.2.1. Nanokompoziti polimerne matrice

Polimerni nanokompoziti (PMNCs) uvođenjem nanopunila u polimernu matricu imaju cilj poboljšati svojstva čistih polimera. Ugljikove nanocijevice izdvajaju se kao jedna od važnijih vrsta nanopunila za pripravu ovakvih kompozita visokih performansi zbog svojih izvanrednih svojstava. Uz njih se koriste i CaCO_3 , SiO_2 , TiO_2 , ZnO , talk, kaolin, čađa, grafit te fulereni. Dodavanje punila polimernoj matrici pruža široko međupovršinsko područje za bolje prijanjanje polimera, a pokretljivost polimernih lanaca se u dodiru s punilom smanjuje, što bi trebalo rezultirati poboljšanim svojstvima i smanjenom brzinom

termičke degradacije. Poboljšana svojstva polimernih nanokompozita u odnosu na čiste polimere očituju se manjom masom, većom čvrstoćom, krutošću i fleksibilnošću, općenito boljim mehaničkim, toplinskim i barijernim karakteristikama, otpornošću na koroziju te povećanom biorazgradivošću biorazgradivih polimera. [18, 20] Polimerni nanokompoziti učestaliji su u zrakoplovstvu u odnosu na nanokompozite keramičke i metalne matrice, a primjenjivi su u strukturnim komponentama zrakoplova, sustavima za prigušivanje vibracija, zaštitnim premazima i mnogim drugim manjim i unutrašnjim dijelovima zrakoplova. [24] Vrste polimernih matrica za primjene u zrakoplovstvu navedene su na slici 4.



Slika 4. Uobičajene polimerne matrice koje se koriste za zrakoplovne kompozite [18]

4.2.2. Nanokompoziti keramičke matrice

Keramički matricni nanokompoziti (CMNCs) sadrže nanovlakna ili nanočestice ugrađene u matricu keramičkog materijala. [20] Osnovni problem čiste keramike je krhki lom, pa nije prikladan materijal na mjestima gdje se pojavljuju vibracije i zamor te pojave pukotina jer je otpornost na širenje istih vrlo niska. Međutim, keramika se odlikuje izvrsnom otpornošću na koroziju te visokom kemijskom i toplinskom postojanošću što je ključno za primjenu u zrakoplovstvu, posebice u komponentama izloženim vrlo visokim temperaturama. [25] Dodavanjem prikladnih ojačavala keramičkoj matrici nastoje se poboljšati svojstva keramike, odnosno povećati otpor prema pukotinama koje iniciraju krhki lom. Tipična ojačavala za keramičke matrice uključuju SiC, TiC, B₄C, AlN i Al₂O₃.

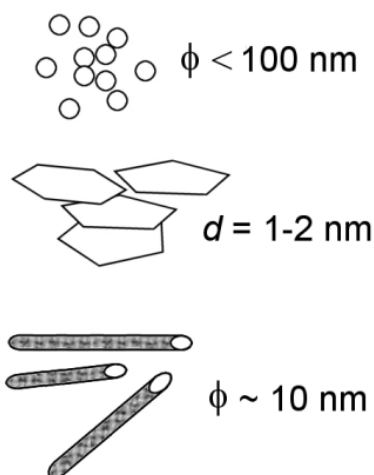
[18] Kao rezultat ugradnje nanovlakana visoke čvrstoće u keramičke matrice, razvijaju se inovativni keramički nanokompoziti izvrsne žilavosti. Keramički nanokompoziti ponajviše su primjenjivi za izradu dijelova lopatica turbinskih motora, izolacijskih premaza, sustava za kočenje i drugih elemenata gdje je potrebna izvrsna otpornost na trošenje i zaštita od visokih temperatura. [26]

4.2.3. Nanokompoziti metalne matrice

Nanokompoziti metalne matrice (MMNCs) imaju poboljšana mehanička svojstva i toplinsku stabilnost u usporedbi s drugim nanokompozitima i metalima. Metalna matrica sadrži laki metal ili leguru poput aluminija, magnezija ili titana. [23] Tipična punila za ovu vrstu uključuju keramičke čestice ili vlakna, ugljična i metalna vlakna nanometarskih dimenzija. [18] Visok omjer čvrstoće i gustoće materijala, visoka žilavost te otpornost na temperaturu i gorenje, izvrsna električna i toplinska vodljivost te nemogućnost apsorpcije vlage, svojstva su koja jednostavno odgovaraju zrakoplovnoj industriji. [27] Općenito je područje nanokompozita metalne matrice u fokusu daljnjeg razvoja s istraživanjima usmjerenim prema pronalaženju ispravnog načina raspodjele i interakcije nanopunila s metalnom matricom. Nanokompoziti metalne matrice primjene će pronaći u komponentama podvozja zrakoplova i motorima gdje je potrebna postojanost na visoke temperature, koroziju i trošenje. [20, 23]

4.3. Vrste nanopunila

Općenito su poboljšana svojstva matričnog materijala, a posljedično i samog kompozita ovisna o karakteristikama punila, njihovoj raspršenosti te međudjelovanju s matricom. Punila se dodaju unutar matrice kako bi se poboljšala određena sekundarna svojstva ili smanjili troškovi materijala. Ukoliko se specifična punila koriste za poboljšanje svojstava, ponajprije mehaničkih, nazivaju se ojačavalima. U daljnjim odlomcima, naglasak će biti na nanopunilima koja imaju ulogu ojačavala, s ciljem poboljšanja mnogih svojstava materijala za zrakoplovne primjene. Unatoč punilima na nanorazini i njihovoj velikoj površini, bez homogene disperzije unutar matrice ne postižu se željeni rezultati, pa tako dobiveni kompozit može biti klasificiran kao konvencionalni. Vrlo često korištena nanopunila uključuju; nanočestice, slojevite silikate i vlaknasta ojačavala. Navedene vrste punila prikazane su (prema redoslijedu navođenja, odozgo prema dolje) na slici 5. [22, 28]



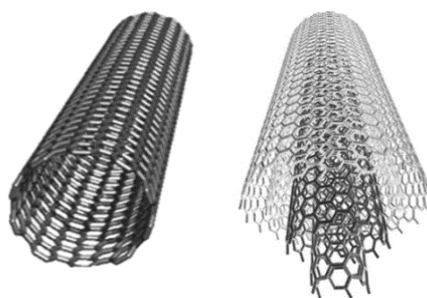
Slika 5. Vrste nanopunila [29]

4.3.1. Slojevita nanopunila

Slojevita ili pločasta nanopunila uključuju slojevite silikate, filosilikate ili smektične gline. Struktura slojevitih silikata sastoji se od tetraedarskih listova u kojima je silicijev atom okružen s četiri atoma kisika te oktaedarskih listova u kojima je aluminij okružen s osam atoma kisika. Filosilikati su najvažnija skupina slojevitih silikata, a sastoje se od dva lista silicijevih tetraedara između kojih je jedan list aluminijevih oktaedara (struktura 2:1). Montmorilonit (MMT) je značajno slojevito nanopunilo koje pripada vrsti prirodnih smektičnih glina. Poradi izomorfne zamjene tetraedarskog kationa Si^{4+} s Al^{3+} ili oktaedarskog Al^{3+} s Mg^{2+} , slagalina ima negativan naboj koji se kompenzira kationima (Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) smještenim između dva sloja. Slojevi su povezani slabim elektrostatskim silama što omogućuje ulazak vode i drugih polarnih tvari između slojeva i širenja rešetke. Nedostatak slojevitih punila jest taj da su polarnog karaktera, pa su mješljivi samo s hidrofilnim polimerima kao što su primjerice poli(etilen-oksidi) ili poli(vinil-alkohol). Stoga je neophodno provoditi organsku modifikaciju slojevitih punila koja se temelji na izmjeni alkalijskih kationa prisutnih u međusloju s organskim površinski aktivnim kationima (alkilamonijevim ili alkilsulfonijevim). [16, 22]

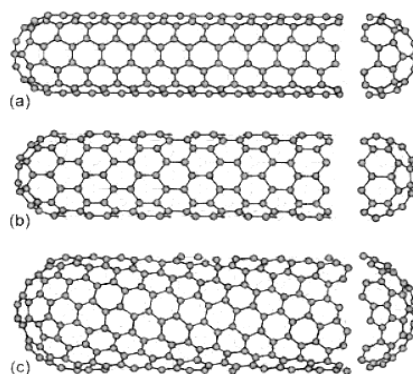
4.3.2. Nanovlakna i nanocijevi

Nanovlaknima se smatraju nanoštapići (kruta nanovlakna), nanožice (električni vodljiva nanovlakna) te nanocjevčice (šuplja nanovlakna). [16] Ugljikove nanocjevčice (CNTs) su najznačajniji predstavnici ove skupine punila, a promjera su manjeg od 100 nm. Moguće ih je zamisliti kao listić grafena savijen u cilindar bez rubova. [22] Dvije su temeljne skupine ugljikovih nanocjevčica: ugljikove nanocjevčice s jednom stijenkom (SWCNTs) i s više stijenki (MWCNTs). Obje vrste ugljikovih nanocjevčica prikazane su na slici 6.



Slika 6. Prikaz ugljikovih nanocjevčica s jednom stijenkom (lijevo) i više stijenki (desno) [30]

Nanocjevčice s više stijenki predstavljaju jednoslojne nanocjevčice raspoređene u koaksijalnoj konfiguraciji. Osnovna struktura obje skupine nanocjevčica proizlazi iz planarne strukture grafena; osnovne građevne jedinice grafita. Listić grafena moguće je saviti na razne načine, pa se ugljikove nanocjevčice kategoriziraju u tri osnovna tipa morfologije; naslonjač (engl. armchair), cik-cak (engl. zig zag) i kiralne (engl. chiral) nanocjevčice. Različite strukture prikazane su na slici 7. [31]



Slika 7. Prikaz tipova nanocjevčica; (a) akiralna – naslonjač (b) akiralna - cik-cak (c) kiralna [19]

Ugljikove nanocjevčice pokazuju izuzetna kemijska, fizikalna, toplinska, mehanička i električna svojstva uključujući vrlo visoku toplinsku i električnu vodljivost, visok modul elastičnosti, čvrstoću i otpornost na koroziju. Raspršivanje nanocjevčica unutar matrice otežano je ne samo zbog njihova međusobnog privlačenja, nego i ispreplitanja pri čemu stvaraju čvorove ili svežnjeve. [22]

4.3.3. Nanočestice

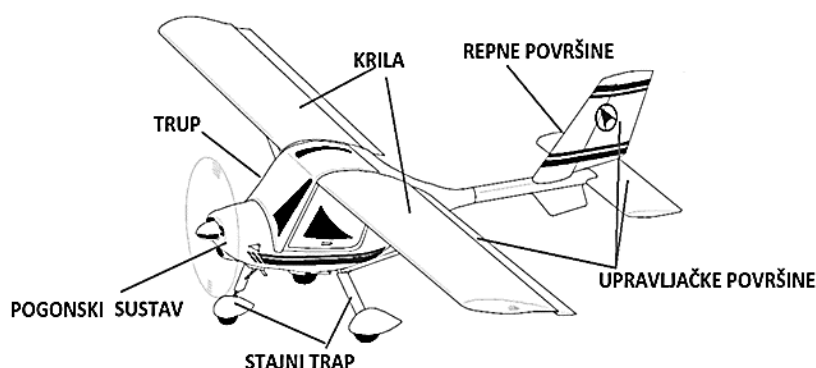
Smanjenje veličina čestica na nanometarsku razinu i njihovo uvođenje unutar matrice dovodi do novih nanokompozitnih materijala jedinstvenih svojstava. Primjerice, nanočestice metala (Al, Fe, Au, Ag...), oksida (ZnO , Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 ...) i karbida (SiC) uobičajeno se koriste za pripremu nanokompozita. Odabir nanočestica ovisi o željenim mehaničkim, toplinskim ili električnim svojstvima materijala. Na primjer, nanočestice aluminija često se odabiru radi dobre vodljivosti, dok se silicijev karbid preferira zbog visoke tvrdoće, čvrstoće te svojstva antikorozivnosti. Kod nanokompozita poboljšanih nanočesticama problem može uzrokovati nejednolikost materijala zbog aglomeracije nanočestica uzorkovane privlačnim van der Waals-ovim silama. Veliki omjer površine i volumena nanočesticama omogućuje dobru difuziju, posebice pri višim temperaturama. Međutim, isto može prouzročiti značajne probleme pri manipulaciji nanočesticama i proizvodnji nanokompozita zbog katalitičkih svojstava i citotoksičnosti, nanočestice mogu uzrokovati probijanje kroz membrane organizma. [22, 28]

5. PRIMJENA NANOKOMPOZITA U ZRAKOPLOVSTVU

Kao što je ranije navedeno, zrakoplovna industrija postavlja iznimno stroge zahtjeve za materijale koji uključuju izvrsna mehanička svojstva, zatim svojstva poput niske apsorpcije sunčevog zračenja, efikasne emisije topline, visoke električne vodljivosti, otpornosti na koroziju, gorenje i trošenje. Nanokompoziti polimerne i keramičke matrice stekli su najveće zanimanje za primjene u zrakoplovstvu, dok je uporaba nanokompozita metalne matrice ograničena zbog izazova u obradi. [18, 32] Ovi materijali primjenjivi su za strukturne dijelove, senzorske sustave, zaštitne premaze kao i brojne druge zrakoplovne komponente. U nastavku je istaknuto nekoliko najnovijih dostignuća iz područja polimernih, keramičkih i metalnih nanokompozita koji se već koriste ili imaju potencijalnu primjenu u zrakoplovstvu.

5.1. Strukturni dijelovi zrakoplova

Strukturni dijelovi obuhvaćaju sve komponente koje čine osnovnu konstrukciju zrakoplova pružajući specifične i aerodinamične karakteristike. Osnovni dijelovi uključuju trup, krila i rep. Zrakoplov je vrlo složen sustav koji obuhvaća pogonski i upravljački sustav, sustav za kočenje, stajni trap te razne spojeve i nosive elemente. Pojedini dijelovi zrakoplova, od nosa do repa, imaju svoju namjenu te doprinose sigurnom i učinkovitom radu. [33] Osnovni strukturni dijelovi zrakoplova prikazani su na slici 8.



Slika 8. Strukturni dijelovi zrakoplova [34]

5.1.1. Trup, krila i rep

Trup ima ključnu ulogu u osiguravanju strukturnog integriteta i funkcionalnosti zrakoplova. U trupu se nalaze kokpit, putnički i teretni prostor te razna oprema. Njegov oblik znatno pridonosi aerodinamici pružajući strukturnu potporu povezujući krila, rep i stajni trap. Glavna uloga zrakoplovnih krila je postizanje i izvođenje leta stvaranjem uzgona. Krila sadrže važne sastavnice kao što su spremnici goriva i zakrilca koja omogućuju naginjanje zrakoplova lijevo ili desno. Repni dio, sastavljen od vertikalnog i horizontalnog stabilizatora, omogućuje stabilnost i preciznu kontrolu upravljanja. [33]

Za izradu ovih strukturnih dijelova, tradicionalno se koriste aluminijske ili titanijske legure. Nanokompoziti metalne matrice s keramičkim punilima mogu pružiti bolja svojstva u odnosu na konvencionalne kompozite, legure ili metale. Na primjer, dodatkom 1 vol. % čestica Si_3N_4 veličine 10 nm u aluminijsku leguru (Al 2024) postiže se vlačna čvrstoća usporediva s vlačnom čvrstoćom te iste legure ojačane s 15 vol. % čestica Si_3N_4 veličine 3,5 μm . [32] Epoksidi ojačani ugljikovim nanocjevčicama izvrstan su izbor materijala za konstrukciju trupa, krila i repa zrakoplova. Ugljikove nanocjevčice imaju izuzetno visoku vlačnu čvrstoću, čak i do stotinjak puta veću u usporedbi s aluminijem ili čelikom. Karakterizira ih otpornost na zamor i udarce te visoka tvrdoća i krutost što je ključno za zrakoplovne dijelove izložene opterećenjima tijekom leta te ekstremnim uvjetima tijekom jakih turbulencija ili udaraca. Smanjena težina epoksida ojačanog nanocjevčicama rezultira nižom potrošnjom goriva što doprinosi ekološkoj održivosti. Disperzija samo 0,5 vol. % ugljikovih nanocjevčica s više stijenki u epoksidnoj matrici poboljšava vlačnu čvrstoću na 121,8 MPa, dok je ona čistog epoksida 95 MPa. Slična poboljšanja svojstava očituju se kod epoksida ojačanih nanočesticama gline. Dodatak nanočestica gline uz mehanička, može poboljšati i barijerna svojstva te smanjiti opasnost od propuštanja goriva, prodora vode, kemikalija ili korozijske. Slojevita struktura silikata stvara barijeru unutar polimernog materijala otežavajući propusnost plinova npr. kisika čime je smanjena mogućnost oksidativne razgradnje. Testovi otpornosti na gorenje pokazali su poboljšanje zbog stvaranja zaštitnog sloja čađe niske propusnosti na površini materijala štiteći tako osnovnu matricu od daljnjeg napredovanja plamena. [18, 23]

5.1.2. Pogonski sustav

Pogonski sustav zrakoplova obuhvaća komponente koje omogućuju generiranje potiska i kretanje. Motor, glavna komponenta ovog sustava, stvara potisak, odnosno silu koja pomiče zrakoplov prema naprijed. Ovisno o vrsti zrakoplova i njegovoj namjeni, motori mogu biti klipni, mlazni ili turbinski. Pogonski sustav uključuje propelere i mlaznice odgovorne za usmjeravanje i ubrzanje protoka zraka, što doprinosi stvaranju potiska. Sustavi za upravljanje motorom i njegovo hlađenje, kao i sustavi za otkrivanje i suzbijanje požara također su sastavni dijelovi pogonskog sustava. [33]

Kombinacija niske gustoće, otpornosti na visoke temperature i koroziju čini keramičke materijale prikladnim za dijelove motora s dužim životnim vijekom i manjim potrebama za održavanjem u usporedbi s konvencionalnim materijalima. Izazovi poput krhkosti keramičkih materijala prevladavaju se dodatkom nanometarskih ojačavala u keramičku matricu, čime se povećava otpornost na rast pukotina. Nanovlakna silicijevog karbida unutar matrice poboljšavaju žilavost i izdržljivost na temperaturama iznad 1300 °C pri čemu teže samo trećinu mase superlegura nikla koje dominiraju u plinskim turbinama i mlaznim motorima. Zamjena superlegura nanokompozitima može smanjiti masu motora za stotine kilograma uz istovremeno poboljšanje potiska za 10 %. [32] Za izradu turbinskih lopatica zrakoplovnih motora, nanokompoziti keramičke matrice izvrstan su izbor. Dok se keramika lomi i raspršuje energiju, punila unutar kompozita preuzimaju opterećenje i održavaju strukturni integritet materijala. Keramika je pasivizirana i ima funkciju prijenosa udarnih opterećenja kojima su turbinske lopatice itekako izložene. [36]

5.1.3. Kočioni sustav

Stajni trap zrakoplova integrira kočioni sustav i ima važnu ulogu pri polijetanju, slijetanju te mobilnosti po površini (pisti). Primarne komponente stajnog trapa uključuju kotače, amortizere i kočnice. Kotači podržavaju težinu zrakoplova i omogućuju kretanje po tlu, dok amortizeri apsorbiraju energiju pri slijetanju, smanjujući opterećenje na konstrukciju zrakoplova. Kočnice su ključne za usporavanje i zaustavljanje zrakoplova. Iako nije uključen u let, stajni trap je neizostavan za sigurnost izvođenja polijetanja i slijetanja. [33]

Sa sigurnosnog gledišta, zrakoplovne kočnice su kritične komponente, posebno pri slijetanju. Materijal u kočnicama i kotačima mora imati pouzdana svojstva trenja i otpornosti na trošenje pod različitim opterećenjima, brzinama i uvjetima okoline. Kočioni

diskovi moraju izdržati i apsorbirati toplinu nastalu kočenjem bez deformacija ili pucanja, a kinetička energija treba biti brzo raspršena za siguran zaustav. Kompoziti na bazi ugljika trenutno su osnovna oprema modernih zrakoplova visokih performansi jer imaju visoku stabilnost na visokim temperaturama, visoku toplinsku vodljivost i specifični toplinski kapacitet te nisku gustoću. Uporaba ugljičnih kočnica rezultira značajnim smanjenjem težine zrakoplova, primjerice, Boeing 757 lakši je za oko 249 kg, a Boeing 767 za oko 363 kg u usporedbi s čeličnim kočnicama. Dodatna poboljšanja mogu donijeti nanopunila poput ugljikovih nanocjevčica koje imaju otpornost na lom desetak puta veću od konvencionalnih kompozita, čime se povećava vijek trajanja kotača zrakoplova i dodatno smanjuju troškovi održavanja. [32, 36] Kombinirane prednosti metalne ili polimerne matrice i ugljikovih nanocjevčica čine ove nanokompozite održivim izborom za stajne trapove i kotače zrakoplova.

5.1.4. Unutrašnjost

Unutrašnjost zrakoplova treba biti pažljivo dizajnirana i raspoređena kako bi se pružila udobnost, sigurnost i funkcionalnost putnicima i posadi.

Poliuretani (PU) su materijali sa širokim rasponom svojstava koji se koriste u raznim primjenama poput premaza, ljepila i pjena. Poliuretanska pjena sastoji se od zatvorenih staničnih struktura u kontinuiranoj matrici, što pridonosi dobrim mehaničkim i izolacijskim svojstvima. Njezina niska gustoća omogućava primjenu u laganim i krutim komponentama kao što su unutarnji paneli zrakoplova, ali se nedostaci očituju u niskoj čvrstoći i toplinskoj stabilnosti. Dodavanje nanočestica gline u PU matricu rezultira prevladavanjem ovih izazova, a povećava i otpornost na gorenje. Ova su svojstva atraktivna za unutrašnjost zrakoplova poput podnih ploča, stropova i sjedala, koji sve više doprinose smanjenju ukupne težine zrakoplova. PU ispunjeni ugljikovim nanocjevčicama ne samo da su lakši, već imaju i visoku sposobnost apsorpcije zvučne i vibracijske energije. Smanjenje težine sjedala rezultira smanjenjem ukupne težine i povećanjem broja sjedala po zrakoplovu. Primjerice, Deutsche Lufthansa, najveća njemačka zrakoplovna korporacija, usvojila je sjedala RECARO BL3520 s manje od 11 kg po sjedalu, što je rezultiralo smanjenjem težine za 30 % u usporedbi s prethodno korištenim sjedalima. Samo za svoju flotu od 330 zrakoplova modela A319, ovo je dovelo do uštede od 137 000 kg ili oko 415 kg po zrakoplovu. Lufthansa je izvijestila da je posljedično smanjenje potrošnje goriva približno 4,3 %. [32]

5.2. Premazi

Zrakoplovne komponente izložene su promjenama temperature i vlage, kao i kontaktu s gorivom, raznim česticama i tekućinama za odleđivanje. Poradi ovih uvjeta, neophodno je primijeniti zaštitne premaze otporne na koroziju i trošenje. Obično se zrakoplovni premazi sastoje od temeljnog premaza i završnog sloja. Temeljni premaz osigurava prijanjanje na podlogu i zaštitu od korozije, dok završni sloj treba imati mat završnu obradu, fleksibilnost, postojanost boje, trajnost i kemijsku otpornost. Nanokompoziti omogućuju prilagodbu mehaničkih, kemijskih, električnih i optičkih svojstava premaza, kao i njihovo selektivno kombiniranje specifičnim potrebama. Razvoj novih premaza za rješavanje problema korozije, erozije i zaleđivanja trenutno je usmjereno područje istraživanja.

5.2.1. Antikorozivni premazi

Ultraljubičaste zrake, vlaga, toplina i oksidativna atmosfera uzrokuju koroziju. Budući da je korozija jedan od primarnih uzroka oštećenja u zrakoplovima, koriste se specijalni premazi za zaštitu od iste. Nužni su premazi niske propusnosti koji stvaraju barijeru za sprječavanje korozivnih medija do korodirajućeg materijala. S druge strane, inhibicijski pigmenti dodani u premaze formiraju zaštitni sloj koji djeluje kao žrtvena anoda koja korodira umjesto tih materijala, obično metala. Najčešće implementirano rješenje za takve materijale su premazi koji sadrže komplekse kroma, no zbog njihove toksičnosti potrebno je razviti prihvatljivije opcije. U obzir dolaze nanočestice SiO_2 , ZnO i Al_2O_3 unutar polimernih matrica koje pružaju izvrsnu barijernu zaštitu zahvaljujući svojoj gustoći i homogenosti. [18, 32]

5.2.2. Premazi za zaštitu od erozije

Erozija uzrokovana djelovanjem čestica pri velikim brzinama intenzivnija je kod kosog upada čestica, a uzrokuje specifične vrste oštećenja na materijalima. Za zaštitu od erozivnih utjecaja konvencionalno se koriste nikal, titan, poliuretanski i epoksidni premazi. Nanostrukturirani premazi koji uključuju nanoglinu i glinicu u epoksidnim matricama, nude dodatna poboljšanja. Ova vrsta nanokompozitnog premaza stvara čvrstu i kompaktnu mrežu poboljšavajući toplinske i barijerne karakteristike te otpornost na oštećenja. Takvi premazi ispunjavaju ključne zahtjeve zrakoplovnih premaza i koriste se za zaštitu površinskih obloga te komponenata pogonskog sustava, posebno motora.

Nanostrukturirani premazi koji koriste karbide, nitride i keramike općenito su predloženi za poboljšanje otpornosti na trošenje. [32]

5.2.3. Premazi za odleđivanje i sprječavanje zaleđivanja

Na visinama između 3 000 i 5 000 ft, atmosferski uvjeti mogu dovesti do stvaranja leda na zrakoplovnim površinama povećavajući težinu i otpor što utječe na aerodinamičke karakteristike, a prvenstveno sigurnost. Konvencionalni sustavi zaštite od nakupljanja leda koriste topli zrak iz motora, što nije ekonomično ni energetski povoljno. Elektromehaničko odleđivanje pomoću ultrazvučnih pobudnika uzrokuje buku i zamor materijala, dok električni grijači, iako učinkoviti, imaju ograničenja u pogledu težine, potrošnje energije i održavanja. Kao inovativno rješenje predlažu se nanokompozitni grijači s ugljikovim nanocjevčicama. Ispitivanja provedena na zrakoplovnim krilima pokazala su njihovu uspješnu učinkovitost pri temperaturama od $-3,9$ do $-20,9^{\circ}\text{C}$. S druge strane, nanočestice u premazima značajno smanjuju prianjanje i održavanje sloja leda ukoliko stvaraju površinu s niskim koeficijentom trenja. Primjerice, nanokompozitni premazi poput onih koji kombiniraju poliviniliden fluorid (PVDF) i ugljikove nanocjevčice s više stijenki, predstavljaju superhidrofobne premaze s kontaktnim kutom od 154° koji smanjuju prianjanje vode čime je mogućnost stvaranja leda otežana. [32]

5.2.4. Premazi za apsorpciju radara

Jedan od bitnih ciljeva apsorpcije mikrovalova u zrakoplovstvu je smanjenje radarskog odraza aviona, poznato i kao *stealth* tehnologija. Apsorbirajući mikrovalove umjesto da ih reflektiraju, površine zrakoplova postaju manje vidljive radarima, što povećava njihovu učinkovitost u borbenim misijama. Za civilne zrakoplove, apsorpcija mikrovalova smanjuje smetnje s elektroničkom opremom, čime se osigurava stabilan i pouzdan rad navigacijskih i komunikacijskih sustava. Nanografite obložen željezom, niklom ili kromom može biti atraktivan izbor za materijal koji apsorbira mikrovalove zbog svojstva dobre vodljivosti, nanomagnetizma i slojevite strukture. Istraživanja su se fokusirala na korištenje željeznog premaza za poboljšanje svojstva nanografita. Nakon oblaganja nanografitnih čestica željezom, raspršene su u PU matricu i nanokompozit je oblikovan u tanke filmove. Ovi su filmovi pokazali učinkovitu apsorpciju mikrovalova, pa se takvi nanokompoziti mogu koristiti kao specijalizirani premazi za apsorpciju radara. [18]

5.3. Ostale primjene

5.3.1. Senzori

Senzori su ključni za pružanje informacija o stanju sustava na zemlji, praćenje sustava u radu te kontrolu parametara u stvarnom vremenu. Nanokompozitni senzori ugrađeni u strukturne komponente mogu otkriti male promjene u oštećenjima, pružajući povratne informacije o strukturnom integritetu kritičnih komponenti. Senzori na bazi ugljikovih nanocjevčica omogućuju praćenje aerodinamičkih performansi, protoka goriva, tlaka i temperature tijekom leta. Primjeri nanostrukturiranih senzora također uključuju nanožice od silicida prijelaznih metala, paladijeve nano-ljuske i ultratanke filmove za detekciju plinova, kao i modificirane materijale cinkovog oksida za UV zračenje. Aktivna kontrola parametara u stvarnom vremenu omogućuje dinamičke prilagodbe za optimizaciju performansi i odgovaranje promjenjivim uvjetima leta. [19,36]

5.3.2. Zaštita od udara groma

Kako se polimerni kompoziti niske električne vodljivosti sve više koriste za izradu trupa i krila zrakoplova, dodatak nanopunila dobre vodljivosti značajno će pridonijeti zaštiti od udara groma. Trenutno se za poboljšanje električne vodljivosti koriste aluminijske ili bakrene mreže ugrađene u površinske slojeve materijala. Međutim, ove mreže su relativno teške i podložne galvanskoj koroziji. Da bi se riješili ovi izazovi, predviđa se uporaba vodljivih ojačanja poput ugljikovih nanocjevčica i nanožica nikla u površinskim slojevima, uz minimalan dodatak težine u odnosu na konvencionalne metalne mreže. Tako dizajnirani slojevi djeluju kao Faradayev kavez, štiteći unutrašnjost zrakoplova od elektromagnetskih smetnji uzrokovanih udarom groma. [18]

5.3.3. Nanokompozitna ljepila

Važna je primjena polimernih ljepila za spajanje komponenti zrakoplova bez potrebe za vijcima ili zakovicama. Razvijaju se polimerna nanokompozitna ljepila koja se koriste za spajanje materijala kao što su metal/metal, kompozit/kompozit i metal/kompozit. Također su primjenjivi za spajanje strukturnih panela, sparova, žica i drugih komponenata. Tanak sloj nanokompozitnog ljepila može se koristiti za spajanje aluminijskih i vlaknasto-polimernih kompozitnih ploča kako bi se proizveo vlaknasto-metalni laminat poznat kao GLARE, koji se široko koristi u trupu zrakoplova Airbus A380. [18, 32]

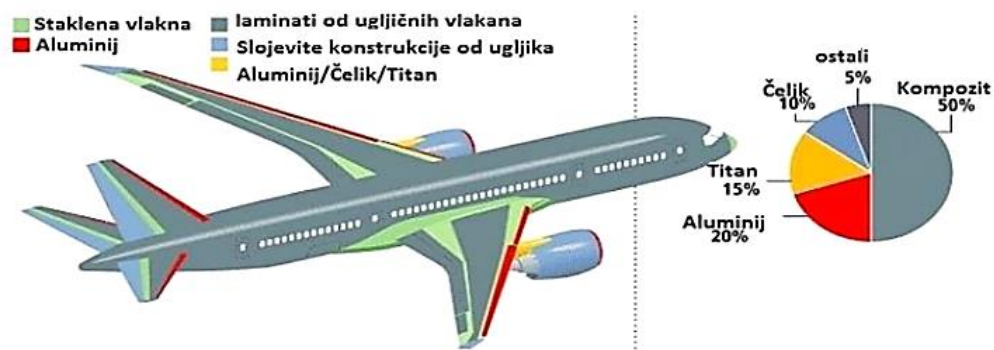
6. PRIMJENA (NANO)KOMPOZITA NA MODERNIM ZRAKOPLOVIMA

Trenutni trend u zrakoplovnoj industriji ukazuje na sve veću primjenu nanokompozita pri čemu se očekuje da će njihova upotreba u bliskoj budućnosti postati sve šira. Komercijalno zrakoplovstvo zaostaje za manjim i vojnim zrakoplovima u korištenju kompozita. No, u velikim putničkim zrakoplovima nove generacije poput Airbusa A380, kompozitna iskorištenost iznosi gotovo 40 %, dok u još novijim modelima kao što su Boeing 787 i Airbus A350 XWB doseže 50 %, odnosno 54 %. Vojni zrakoplov Lockheed Martin F-35 koristi i kompozitne i nanokompozitne materijale, a slovenska tvrtka Pipistrel poznata je po proizvodnji malih laganih zrakoplova skoro u cijelosti od kompozita. [18]

Polimeri ojačani ugljičnim vlaknima (CFRP) postali su ozbiljan suparnik čeliku i aluminiju kao materijal za primarne strukture. Međutim, šira primjena ovih kompozita u komponentama koje nose opterećenje, a ne samo u ne nosivim dijelovima komercijalnih i vojnih zrakoplova, počela je tek nakon dva desetljeća razvoja. Slično tome, uvođenje polimera ojačanih ugljikovim nanocjevčicama (CNRP) u strukture koje ne nose opterećenje trenutno je otpočeta, a kako tehnologija napreduje, očekuje se sve šira primjena CNRP-a u primarnim i nosivim strukturama zrakoplova. U sljedećim odlomcima prikazana su po tri primjera upotrebe kompozitnih i dva primjera nanokompozitnih materijala. [18, 27, 38]

6.1. Boeing 787 Dreamliner

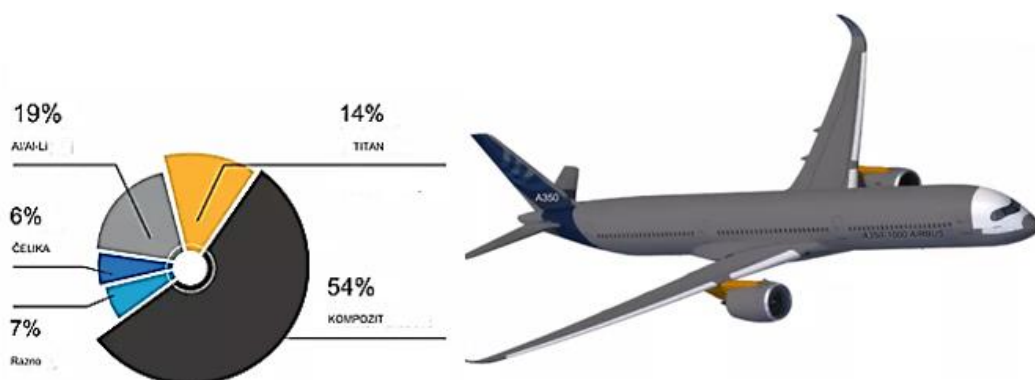
Boeing 787 Dreamliner predstavlja jedan od najmodernijih komercijalnih zrakoplova u pogledu upotrebe kompozita. Središnji dio krila i trup ovog zrakoplova izrađeni su od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima. Na vrhovima krila i repnim dijelovima koristi se aluminij, titan u dijelovima motora i pričvrtnim elementima, a čelik u komponentama koje zahtijevaju dodatnu čvrstoću. Dosad, najekonomičniji Boeingov model, 787 Dreamliner smanjuje potrošnju goriva do 20 % u usporedbi s prethodnim modelima. Također smanjuje emisije štetnih plinova i buku te pruža niže operativne troškove, što doprinosi njegovom statusu ekološki prihvatljivijeg zrakoplova u svojoj klasi. Na slici 9 prikazani su materijali korišteni na zrakoplovu B787. [18, 37]



Slika 9. Materijali korišteni za izradu zrakoplova Boeing 787 Dreamliner [38]

6.2. Airbus A380 i A350 XWB

Airbus A380 trenutno je najveći dvopalubni putnički zrakoplov na svijetu s više od 40 % kompozitnih materijala, posebice u dijelovima krila što smanjuje težinu za gotovo 1,5 t u usporedbi s najnaprednijim aluminijским legurama. Airbus A350 XWB koristi polimerne materijale ojačane ugljičnim vlaknima, pa čak i nanocjevčicama, smanjujući potrošnju goriva za 25 % u odnosu na konkurente. Otprilike 54 % njegove konstrukcije čine kompoziti, što poboljšava performanse i smanjuje troškove održavanja. Iako su kompozitne komponente skuplje za proizvodnju, omogućuju upola manje zadatka održavanja kod zrakoplova A350, a prag za provjeru konstrukcije je dvanaest godina u usporedbi s osam za A380. [7, 18] Na slici 10 prikazani su materijali korišteni na zrakoplovu A350.



Slika 10. Materijali korišteni za izradu zrakoplova Airbus A350 XWB [7]

6.3. Lockheed Martin F-35 Lightning II

F-35, prikazan na slici 11, jedan je od najnaprednijih borbenih zrakoplova nove generacije s jednim sjedalom i motorom, dostupan u tri varijante; F-35A, F-35B i F-35C, koje su prilagođene različitim operativnim potrebama. Ovaj zrakoplov koristi vrhunsku tehnologiju uključujući napredne senzore, komunikacijske sustave te nanokompozitne premaze za promicanje nevidljivosti radarima. Iako se konkretni detalji o korištenju nanokompozita ne objavljuju naširoko, poznato je da F-35 koristi ugljikove nanocjevčice u vrhovima krila, a epoksid ojačan tim nanocjevčicama omogućuje mu 30 % lakšu i značajno čvršću strukturu od polimera ojačanih ugljičnim vlaknima. Kombinacija nanotehnoloških elemenata omogućuje superiorne performanse i tehnološku prednost, što je upravo prikazano u Lockheedovom centru za energetska rješenja gdje se naglašava kako nanotehnologija revolucionira dizajn i proizvodnju modernih zrakoplova. [18]



Slika 11. Zrakoplov Lockheed Martin F-35 Lightning II [37]

6.4. Boeing 777X

Boeing 777X, najnovija verzija popularne serije 777 koju je razvila američka tvrtka Boeing, predstavlja širokotrupni putnički zrakoplov s najsuvremenijom tehnologijom. Ovaj model dolazi s najvećim komercijalnim krilima izrađenim od kompozita i nanokompozita, što im omogućuje da budu duža, fleksibilnija, ali i dalje čvrsta i lagana. Mogućnost sklopivih krila, zahvaljujući nanokompozitima, dodatno poboljšava aerodinamičnost. Zrakoplov je opremljen GE9X motorima tvrtke General Electric Aviation, najefikasnijim komercijalnim mlaznim motorima do sada, a kojima se ostvaruju znatne uštede goriva i manja buka. Ovi

motori, uz ostale materijale, koriste i izdržljive keramičke nanokompozite otporne na visoke temperature. Iako je prvi probni let izveden 2020. godine, zrakoplov još uvijek nije uveden u komercijalnu uporabu zbog potrebe za dodatnim testiranjima i certifikacijom. [27, 37]



Slika 12. Zrakoplov Boeing 777X [39]

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu su razmotrena svojstva nanokompozita i zahtjevi koje oni moraju ispuniti kako bi unaprijedili sigurnost i optimalne performanse zrakoplova. Razvoj nanokompozita predstavlja značajan tehnološki napredak, omogućujući proizvodnju lakših, izdržljivijih i efikasnijih zrakoplova zahvaljujući izvanrednim svojstvima. Ovi materijali smanjuju masu zrakoplova bez kompromisa u čvrstoći, što rezultira smanjenom potrošnjom goriva, manjim operativnim troškovima, povećanom nosivošću i ekološkom koristi. Osim mehaničkih svojstava, nanokompoziti pružaju bolju toplinsku stabilnost i kemijsku otpornost, produljujući vijek trajanja dijelova i smanjujući potrebu za čestim održavanjima. Iako nanokompoziti imaju brojne prednosti, njihova široka primjena suočava se sa značajnim izazovima. Za osiguranje optimalnih svojstava ključna je kompatibilnost matrice i nanopunila te njihova homogena raspršenost, budući da su nanometarska punila sklona aglomeraciji. Prevladavanje ovih izazova zahtijeva napredne tehnologije obrade i precizno upravljanje procesima. Proizvodnja i obrada nanokompozita zahtijevaju specijaliziranu opremu i visoko kvalificiranu radnu snagu, što povećava troškove. Osim toga, potrebna su temeljita istraživanja za procjenu dugoročne pouzdanosti ovih materijala u stvarnim uvjetima eksploatacije.

Vodeći svjetski proizvođači poput Airbusa i Boeinga prepoznali su potencijal nanokompozita i ulažu značajna sredstva u njihovu integraciju u zrakoplovne konstrukcije. Dosadašnja istraživanja pokazala su uspješnu integraciju nanokompozita u manje zahtjevne dijelove zrakoplova, senzorske sustave i premaze. Međutim, za primjenu u cjelovitim primarnim strukturnim komponentama potrebni su strogo kontrolirani certifikacijski postupci i daljnja istraživanja kako bi se osigurala visoka razina sigurnosti. Iako je jasno da tehnološke inovacije poput ovih naprednih kompozitnih materijala zahtijevaju vrijeme i opsežan razvoj prije nego što postanu široko prihvaćene u industriji, zrakoplovna industrija nastoji ubrzati integraciju nanokompozita u primarne strukturne komponente. U sljedećem desetljeću može se očekivati značajan porast upotrebe ovih materijala, kako u strukturnim tako i u ne strukturnim dijelovima zrakoplova, uz mogućnost dopune konvencionalnim kompozitima.

8. POPIS OZNAKA I KRATICA

σ	rastezna čvrstoća [MPa]
ε	deformacija ili produljenje [%]
Φ	promjer [nm]
ft	stopa
t	tona
PMNCs	nanokompoziti polimerne matrice
CMNCs	nanokompoziti keramičke matrice
MMNCs	nanokompoziti metalne matrice
CNTs	uglikove nanocjevčice
SWCNTs	uglikove nanocjevčice s jednom stijenkom
MWCNTs	uglikove nanocjevčice s više stijenki
CaCO ₃	kalcijev karbonat
SiO ₂	silicijev dioksid
TiO ₂	titanijev dioksid
ZnO	cinkov oksid
SiC	silicijev karbid
TiC	titanijev karbid
B ₄ C	bor karbid
AlN	aluminijev nitrid
Al ₂ O ₃	aluminijev oksid, glinica
Si ₃ N ₄	silicijev nitrid
MMT	montmorilonit
PU	poliuretan
PVDF	poliviniliden fluorid
GLARE	metalni (aluminijski) laminat ojačan staklenim vlaknima
UV	ultraljubičasto (zračenje)
CFRP	polimer ojačan ugljičnim vlaknima
CNRP	polimer ojačan ugljikovim nanocjevčicama
vol. %	volumni postotak (jedne tvari u odnosu na ukupni volumen)

LITERATURA

- [1] Ćorić, D., Filetin, T., Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [2] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I., Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, interna skripta, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.
- [3] Jurilj, J., Avijacija i avion, Despot Infinitus d.o.o., Zagreb, 2014.
- [4] <https://www.thomasnet.com/> (pristup 4. ožujka 2024.)
- [5] <https://www.king-titanium.com/technical-article/aviation-sr71.html> (pristup 7. ožujka 2024.)
- [6] <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/a-material-revolution> (pristup 4. ožujka 2024.)
- [7] <https://www.airbus.com> (pristup 4. ožujka 2024.)
- [8] <https://astforgetech.com> (pristup 7. ožujka 2024.)
- [9] <https://www.acornwelding.com> (pristup 9. ožujka 2024.)
- [10] <https://www.machinemfg.com> (pristup 17. ožujka 2024.)
- [11] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2002.
- [12] <https://enciklopedija.cc> (pristup 10. ožujka 2024.)
- [13] <https://pritamashutosh.wordpress.com> (pristup 17. ožujka 2024.)
- [14] Vrsaljko, D., Nastavni materijali iz kolegija Mehanika materijala, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2020./2021.
- [15] <https://www.monografias.com> (pristup 24. ožujka 2024.)
- [16] Kurajica, S., Lučić Blagojević, S., Uvod u nanotehnologiju, HDKI, Zagreb, 2017.
- [17] Asha, A., B., Narain, R., Nanomaterials properties, Polymer Science and Nanotechnology, 2020.

- [18] Joshi, M., Chatterjee, U., Polymer nanocomposite: an advanced material for aerospace applications, u: Rana, S., Figueiro, R. , Advanced composite materials for aerospace engineering, processing, properties and applications, Woodhead Publishing, **8** (2016)
- [19] Bellucci, S., Micciulla, F., Brief Introduction to Nanocomposites for Electromagnetic Shielding, u: Cabrera, C., R., Miranda, F., A., Advanced Nanomaterials for Aerospace Applications, CRC Press, **9** (2014) 227-254.
- [20] Patel, S. i Soni, S., A review on Nanocomposites and their engineering applications, Division of Mechanical Engineering, Institute of Technology, Nirma University, 2023.
- [21] Kamigaito, O., What can be improved by nanometer composites?, Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, **38** (1991) 315-321.
- [22] Ivanković, M., Polimerni nanokompoziti, Polimeri, **28** (2007) 156-167.
- [23] Rathod, V. T., Kumar¹, J. S., Jain, A., Polymer and ceramic nanocomposites for aerospace, Applied Nanoscience, **7** (2017) 519-548.
- [24] Bhat, A., Budholiya, S., Aravind Raj, S., Sultan, M. T. H., Hui, D., Md Shah, A. U., Safri, S. N. A., Review on nanocomposites based on aerospace applications, Nanotechnology Reviews, **10** (2021), 237-253.
- [25] Manikandan, S. i sur., Ecotoxicology of Nanocomposite Materials, Biosciences Biotechnology, Research Asia, **20** (2023) 757-771.
- [26] Al-Mutairi, N. H., Mehdi, A. H., Kadhim, B. J., Nanocomposites materials definitions, types and some of their applications: a review, European Journal of Research Development and Sustainability, **3** (2022) 102-108.
- [27] <https://www.azonano.com/> (pristup 25. ožujka 2024.)
- [28] Brčić, M., Numeričko modeliranje mehaničkog ponašanja nanokompozitnih struktura, Doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2012.
- [29] Macan, J., Kompozitni materijali, interna skripta, FKIT, Zagreb, 2020.
- [30] <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/carbon-nanotubes> (pristup 1. svibnja 2024.)
- [31] Lau, K. T., Hui, D., The revolutionary creation of new advanced materials - carbon nanotube composites, Composites Part B, Engineering **33**(2002) 263-277.

- [32] Prabhakaran, R., Nanocomposites for aircraft applications, *J. Aerosp. Sci. Technol* **66**(2014) 169-185.
- [33] <https://www.flightschoolusa.com/> (pristup 11. srpnja 2024.)
- [34] <https://www.bug.hr/avijacija/> (pristup 11. srpnja 2024.)
- [35] Kausar, A., Ahmad, I., Leading-edge polymer/carbonaceous nano-reinforcement nanocomposites—opportunities for space sector, *Advances in Materials Science*, **23**(2023) 99-122.
- [36] Ran, Z., Application of carbon nanotube composite materials in aviation, Department of physics, Inner Mongolia University, China, 2023.
- [37] <https://simpleflying.com/> (pristup 20. srpnja 2024.)
- [38] <https://www.modernairliners.com/> (pristup 19. srpnja 2024.)
- [39] <https://www.aerosociety.com/> (pristup 23. srpnja 2024.)